

전기기계식 배터리 시스템용 초고속 전동발전기의 설계, 제작 및 모드별 특성

論 文
48B-8-2

Design, Manufacture and Performance Characteristics under Each Mode of High-Speed Motor/Generator for Electro-Mechanical Battery System

長錫明* · 徐鎭鎬** · 鄭相燮*** · 崔相奎[§] · 咸尙龍^{§§}
(S. M. Jang · J. H. Seo · S. S. Jeong · S. K. Choi · S. Y. Ham)

Abstract - This paper treated the design, manufacture and the performance characteristics under each mode of high speed motor/generator for an electro-mechanical battery(EMB). This machine is employed as an integral part of a flywheel energy storage system(FESS), i.e., a modular flywheel system to be used as a device for storing electrical or mechanical energy. In this machine, the magnetic field system is constructed by using special magnet array, dipole Halbach array with 16 permanent magnet segments and the armature is composed of a plastic bobbin and multi-phase windings with Litz wire. The magnet array produces a highly uniform dipole field without back iron. The motor/generator is 3-phase machine in which the dipole Halbach array surrounding the winding is rotating. Since there are no iron laminations, this field system offers some unique advantages for the simplicity of the design and the theoretical prediction of characteristics of a high speed electric machine. This paper describes the results obtained when EMB system was tested in the laboratory.

Key Words : High speed, EMB, FESS, Halbach array

1. 서 론

전기기계식 배터리(Electro-mechanical Battery; 이하 EMB) 시스템은 전동모드로 잉여 전기에너지를 기계적 운동 에너지로 저장하였다가, 필요시 발전모드로 전기 에너지를 출력하여 사용하는 방식으로, 화학식 배터리와 같이 소형화, 모듈화가 가능하여 흔히 플라이휠 에너지 저장 시스템(Flywheel Energy Storage System; 이하 FESS)이라고도 불리운다[1,2].

EMB 시스템은 콤팩트하면서도 고에너지밀도 기기를 필요로 하는 우주 및 항공산업이나 잠수함, 전기자동차 등과 같은 특수 첨단분야에서의 필수 핵심요소가 된다. 그런데 고밀도 에너지 기기화를 위해서는 운전속도를 수만부터 수십만 rpm 정도까지 초고속화 해야한다. 그러나 초고속 기기는 동일 출력용량의 범용 저속모터에 비하여 자기회로의 체적이 속도에 반비례로 작아지므로 초소형, 경량화가 가능하지만, 초고속회전에 따른 회전자의 기계적인 스트레스나 초고주파 입력전원에 의한 철손이 크게 발생하는 등 문제점들이 많다. 따라서 초고속기기는 회전자의 구조가 단순하고 튼튼해야 하므

로 유도형보다는 릴럭턴스형이나 스위치드 릴럭턴스형 등의 동기거나 직류기가 더욱 적합한 것으로 평가되고 있다[3,4]. 최근에는 영구자석으로 자기회로를 구성하여 더욱 콤팩트하고 고밀도화된 브러시리스형 기기의 응용개발이 빠른 속도로 확산되고 있다. 그러나 브러시리스형 기기도 자기회로의 자속 누설을 방지하기 위하여 영구자석 이외에 별도의 자성체로 폐자로를 이루어야 하고, 초고주파 전원에 의한 자성체내의 철손이 크게 발생하므로 특별한 대책을 필요로 한다[4].

본 논문에서는 초고속 구동에 적합한 것으로 평가되는 영구자석의 Halbach 배열법을 EMB 시스템 구동용 전동발전기에 응용하였다. Halbach 배열은 여러 개의 영구자석편만으로 자기회로를 구성하여 설계자가 의도하는 방향만으로 강한 자계를 발생시킬 수 있기 때문에 자성체에 의한 별도의 폐자료가 필요 없다[4]. 따라서 영구자석만에 의하여 계자를 구성하므로 초고주파 전원에 의한 철손 발생이 없을 뿐만 아니라 자기회로의 콤팩트성, 고에너지성을 만족하게 되는 특별한 장점을 가지므로 EMB용 초고속 전동발전기나 동기형 리니어모터에 매우 적합한 방식인 것으로 평가된다[1,2,4,5,6]. 그러나 초고속 전동발전기에의 Halbach 배열 응용은 1990년에 미국의 R.F.Post가 제안한 바는 있으나 개략적인 내용만 발표되었기 때문에 자세한 설계 제작 과정이나 결과를 알 수가 없다[2].

따라서 본 논문에서는 초고속 전동발전기의 설계법을 확립하여 설계·제작하였으며 EMB 시스템에 응용하여 그 특성을 해석하였다. 즉, NdFeB 영구자석에 의한 Halbach 배열을 이용하여 코어리스(Coreless) 자기 구조를 갖는 2극 외전형

* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

§ 非 會 員 : 韓國機械研究院 先任研究員

§§ 非 會 員 : 韓國機械研究院

接受日字 : 1998年 9月 11日

最終完了 : 1999年 7月 2日

전동발전기의 계자 시스템에[4], 플라스틱 보빈에 여러 가닥의 리츠선(Litz wire)으로 권선을 시행한 전기자와 플라이휠 자기베어링을 설치하여 EMB 시스템을 구성하였다. 즉, 초고속으로 구동하는 경우에 크게 발생하는 칠손과 코일의 표피손은 최소화되도록 설계·제작되었다. 제작된 전동발전기는 유한요소 해석과 실험을 통해 자체 특성과 전기자 저항과 인덕턴스를 설계치와 비교하였으며, 이를 통해 Halbach 배열형 전동발전기의 초고속성을 검토하였다. 또한 자기베어링과 플라이휠을 장착한 전동발전기를 진공 챔버에서 운전하는 등 EMB 시스템을 구성하여 해석과 실험을 통하여 전동모드 및 발전 모드시의 주요특성을 얻어 이를 분석·검토하였다. 이로써 이 분야의 연구개발을 위한 기본을 확립하였다.

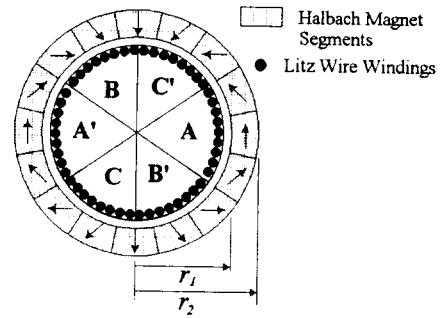


그림 2 EMB 시스템용 Halbach 배열형 M/G의 기본 구조
Fig. 2 Halbach array type M/G for EMB system

2. EMB 시스템과 초고속 전동발전기 설계

2.1 EMB 시스템용 초고속 전동발전기

그림 1과 같은 EMB 시스템은 잉여 전기에너지를 기계적인 운동에너지로 저장하였다가, 필요시 전기 에너지로 출력하여 사용하는 에너지 저장 장치이다. 이 때 전기 및 기계 에너지의 상호 변환장치로 전동발전기가 이용되는데, 시스템의 소형화 및 모듈화를 위해 콤팩트하면서도 고에너지밀도의 기기이어야 만 한다. 따라서 체적당 출력과 효율이 높은 초고속의 전동발전기가 필수 핵심요소이다.

그림 2는 플라이휠을 이용한 EMB 시스템용 Halbach 배열형 전동발전기의 기본구조를 보여준다. FESS의 구조적인 특성상 전동발전기는 Halbach 배열로 구성된 계자가 바깥쪽에 위치하여 복합체로 구성된 플라이 휠과 함께 회전하고, 계자 내부에는 플라스틱 보빈과 코일로 구성된 전기자를 갖는 외전형 기기이다.

2.2 전동발전기 시스템 구성 및 운전개요

그림 3은 EMB 시스템용 전동발전기의 구동 및 발전을 위한 시스템의 구성도이다. 즉, 평상시에는 220V, 60Hz 계통에서 부하와 EMB 시스템에 전력을 공급한다. 이 때 EMB 시스템의 전동발전기는 AC/DC 컨버터와 3상 풀브릿지(Full bridge) 인버터에 의해 전동기로 구동하게 된다.

그러나 계통의 정전시에는 전동발전기는 발전기로 동작하여 저장된 플라이휠의 운동에너지에 의해 3상 교류 전원을

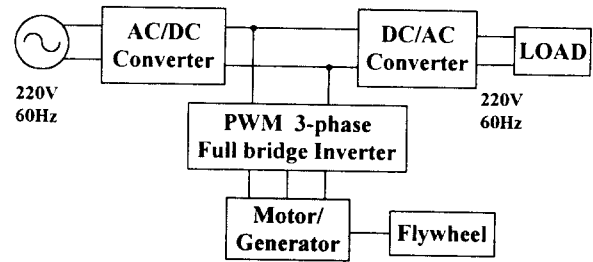


그림 3 전동발전기 시스템의 구성도
Fig. 3 Block diagram of a motor/generator system

발생한다. 그리고 이를 3상 플브릿지 인버터 회로를 통해 직류전원으로 변환하여 최종적으로 DC/AC 컨버터를 거쳐 부하에 전력을 공급하게 된다. 이때 부하의 전력소모에 의해 플라이휠의 속도가 점차 감소되어 발전전압도 낮아지므로, 이를 컨버터에서 승압하여 220V, 60Hz의 단상 정전압원으로 부하에 전력을 공급하게 된다.

2.3 전동발전기의 설계를 위한 특성식

2.3.1 발전 전압 및 토크식

외전형 전동발전기가 ω [rad/sec]속도로 회전하는 경우, 영구자석 Halbach 배열 내부에서의 반경방향의 기본파 자속밀도는 식(1)과 같이 주어진다.

$$B(t) = B_0 \cos(\omega t) \tag{1}$$

여기서, B_0 는 공극자속밀도의 최대치[Wb/m²]로 식(2)에 의하여 구해진다.

$$B_0 = B_r C_N \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) / \mu_r \tag{2}$$

여기서 r_1, r_2 은 각각 그림 2의 계자 외반경과 내반경[m]이며, B_r 과 μ_r 은 각각의 영구자석 잔류자속밀도와 투자율이다. 또한 영구자석 배열수, 즉 영구자석편이 증가할수록 원통 내부의 자속밀도가 증가하는데, 이를 고려한 보정계수가 C_N 이다[1,2,5]. 따라서 전기자의 상당 턴수 N 에 유기되는 순시치 전압은 식(3)과 같다.

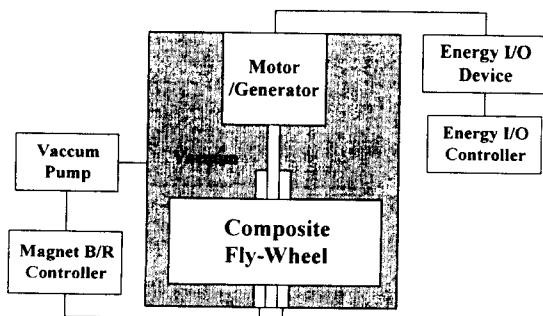


그림 1 EMB 시스템의 개략도
Fig. 1 Concept diagram of EMB system

$$e(t) = KANB_0\omega\sin(\omega t) \quad (3)$$

여기서 A 는 권선 한턴의 면적[m²], K 는 계자에 의해 발생되는 2극 자속과 쇄교하는 전기자는 원형단면적으로 구성되기 때문에 이를 직선적인 값으로 보정한 기하학적 계수이다. 따라서 전동발전기가 Y결선일 경우 유기전압상수는 식(4)와 같다.

$$K_E = \frac{e_{LL}}{\omega} = \sqrt{3}KANB_0 \quad [V \cdot \text{sec}/\text{rad}] \quad (4)$$

여기서 e_{LL} 은 선간전압의 최대치이다.

전동기 모드에서 잉여 전기에너지로 플라이휠을 일정속도까지 가속하는데 필요한 토크 T_s 는 회전체 관성모멘트 J 와 이를 정지상태에서 최대속도까지 가속하는데 소요되는 시간에 의해 결정된다. 따라서 전동모드시 전기자 임피던스 강화와 손실을 무시한다면 가속토크는 식(5)와 같다.

$$T_s = J \frac{d\omega}{dt} = K_T I_s \quad [N \cdot m] \quad (5)$$

여기서 I_s 는 가속시 전기자 입력전류이다. 식(5)의 토크상수 K_T 는 전동모드시 180° 도통각을 갖는 구형과 운전을 할 경우에는 식(4)의 유기전압상수 K_E 와 같다.

2.3.2 등가회로 정수

초고속 구동에서는 매우 큰 역기전력을 발생하기 때문에 전기자의 상당 턴수가 작도록 설계한다. 또한 Halbach 배열을 이용하기 때문에 계자에 별도의 철심이 없으므로 전기자 인덕턴스와 저항이 철심으로 구성되는 전기기기보다 작다.

그림 4는 부하저항 R_L 을 갖는 전동발전기의 상당 등가회로이다. 회로정수 중 유기기전력의 실효치는 식(3)과 같고 권선의 상당 저항은 식(6)과 같다.

$$R_0 = \frac{4\rho N(l_a + r)}{S_{Litz}} \quad [\Omega] \quad (6)$$

여기서 l_a : 전기자 축방향 길이, r : 전기자 평균반경, N : 상당 권선수, S_{Litz} : Litz wire의 권선당 단면적이다. 또한 상당 인덕턴스는 식(7)과 같다.

$$L_0 = 2\mu l_a r_s \frac{N^2}{l_w} \Theta \quad [H] \quad (7)$$

여기서 r_s : 축반경, l_w : 상당 전기자 권선의 전체 폭의 평균값, Θ : 코일 단부에서 누설을 고려한 長岡係數로 반경과 길이에 의해 결정되며 그림 2와 같은 구조의 경우 대략 0.53 정도가 된다[7].

2.3.3 출력 및 효율식

EMB 시스템의 컨버터부에서의 손실이 없다고 가정한다면 부하에 공급하는 에너지 ΔW_e 는 플라이휠의 회전 운동에너지의 변화량 ΔW_m 과 같으므로 식(8)과 같이 표현된다.

$$\Delta W_e = \Delta W_m \quad (8)$$

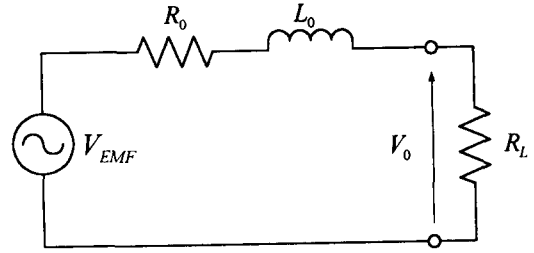


그림 4 전동발전기의 상당 등가회로

Fig. 4 Equivalent circuit for M/G machine, per phase

또한 전동발전기의 상당 출력은 식(9)와 같다[2].

$$P_1 = \frac{V_0^2}{R_L} \left\{ \frac{1}{\left(1 + \frac{R_0}{R_L}\right)^2 + \left(\frac{\omega L_0}{R_L}\right)^2} \right\} \quad (9)$$

여기서 V_0, R_L 은 각각 그림 4에서 보듯이 상당 단자전압과 부하저항이다. 그리고 Halbach형 전동발전기는 코어리스 구조이므로 손실은 대부분 저항손이며, 효율은 식(10)과 같다.

$$\eta = \frac{R_L}{R_0 + R_L} \quad (10)$$

2.4 요구사항과 설계 파라미터

2.4.1 요구사항

전동발전기의 설계 파라미터는 EMB 시스템의 최고 속도까지의 가속시간, 저장에너지의 크기와 전기적 출력 등에 의해 결정된다. EMB 시스템의 출력은 6[kW]이며 가용 저장에너지는 550[Wh]급이다. 발전모드에서의 출력은 플라이휠의 회전속도가 60,000[rpm]으로부터 30,000[rpm]까지 감속하는 동안 발전전압이 300[V]에서 150[V]까지 발생하는 것으로 설정하였다. 그리고 전동모드시 정지상태에서 최대 운전속도인 60,000[rpm]까지 가속하는데 소요되는 시간은 3분으로 정격 토크와 용량을 산정하기 위한 주요 파라미터가 된다. 따라서 목표 EMB 시스템의 요구사항을 정리하면 표 1과 같다.

표 1 EMB 시스템의 요구사항

Table 1 Required specifications of EMB system

항목	치수	항수	값
최고운전속도	60000 [rpm]	최대저장에너지	734 [Wh]
최저운전속도	30000 [rpm]	가용저장에너지	550 [Wh]
정격 출력	6 [kW]	정전보상시간	1800 [sec]
출력 전압	220 [V _{rms}]	출력 주파수	60 [Hz]
가속시간	1800 [sec]	관성모멘트	0.16[kg · m ²]
계자 외경	75 [mm]	계자 외경	105 [mm]이내

※ 전동발전기의 계자 외경과 내경의 최종 치수는 발전전압, 자속밀도, 권선수 등을 고려하여 결정함.

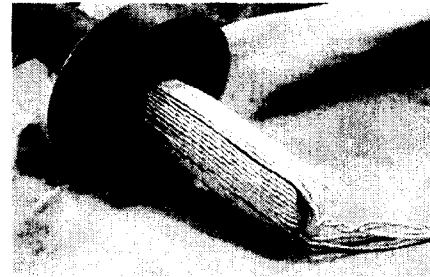
2.4.2 설계파라미터

그림 2와 같은 전동발전기의 설계모델에서 자기회로 및 전기회로의 설계파라미터 값은 2.3절에서의 식(1)에서 식(10)까지의 특성식을 바탕으로 하여 그림 5와 같은 과정을 통하여 도출된다. 그 결과는 표 2와 같다.

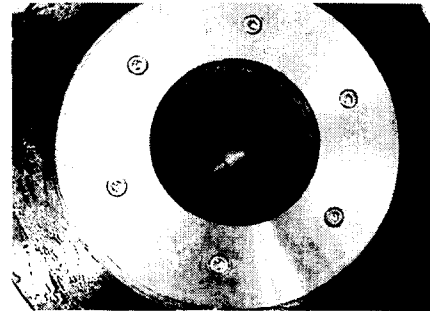
3. 전동발전기의 제작 및 자계 특성과 회로정수를 통한 초고속성 검토

3.1 제작

표 2의 설계사양에 의해 제작된 전동발전기의 사진은 그림 6과 같다. 그림 6(a)는 플라스틱 보빈에 리쯔선을 시행한 전기자이고, 그림 6(b)는 Halbach배열에 의한 계자를 비자성체인 알루미늄과 복합재 휠에 직접 장착한 외전형 회전자이다.



(a)



(b)

그림 6 전기자 및 외전형 계자의 실제 제작된 사진

- (a) 플라스틱 보빈에 리쯔선을 감은 전기자 권선
- (b) 복합재 휠에 둘러싸인 외전형 계자

Fig. 6 Photograph of manufactured armature and rotor

- (a) Armature with Litz wire and a plastic bobbin
- (b) Outer rotor surrounded by composite wheel

전동발전기의 계자를 구성하는 영구자석은 내부공간에 2극의 자계가 발생할 수 있도록 그림 2의 전동발전기 모델과 같이 16 조각의 자석편을 각각 45°씩 화살표방향으로 자화시킨 후 Halbach 배열에 의해 조합하였다[4]. 영구자석 바깥쪽은 비자성체인 알루미늄으로 둘러싸여 있으며 복합재 플라이휠과 직접 연결된다. 제작에 사용된 영구자석은 네오디움계열로 잔류자속밀도 $B_r = 1.17[\text{Wb/m}^2]$, 보자력 $H_c = 10800[\text{Oe}]$ 이다.

3.2 Halbach 배열형 계자의 자계 특성

그림 7은 설계된 Halbach 배열 계자 모델을 2차원 유한요소법에 의하여 해석한 자속분포로 Halbach 배열 내부에는 2극의 균일한 자계가 발생하고, 외부로의 누설 자속이 거의 없으므로 별도의 폐자로를 위한 자성체가 없어도 된다.

그림 8은 원통형 계자 내부의 자속밀도 분포를 2D-FEM 해석치와 측정치를 비교하였다. 즉 각도에 따른 반경방향 자속밀도값을 반경 $r=25[\text{mm}]$ 에서 축방향으로 $z=25[\text{mm}]$, $z=75[\text{mm}]$, $z=125[\text{mm}]$ 의 각 위치에서 해석과 측정을 수행한 결과이다. 그림 9는 3D-FEM과 자속계에 의한 측정치를 비교한 그래프이다[4]. 그림 8과 그림 9로부터 Halbach 배열의 양끝단($z=0$ 또는 $z=178[\text{mm}]$)을 제외한 임의의 축방향 위치에서 자속밀도의 최대치가 식(2)에 의한 설계치는 $0.275[\text{T}]$, FEM 해석치는 $0.27[\text{T}]$, 제작 후 측정치는 약 $0.25[\text{T}]$ 로 비교적 설계치와 잘 부합됨을 알 수 있다.

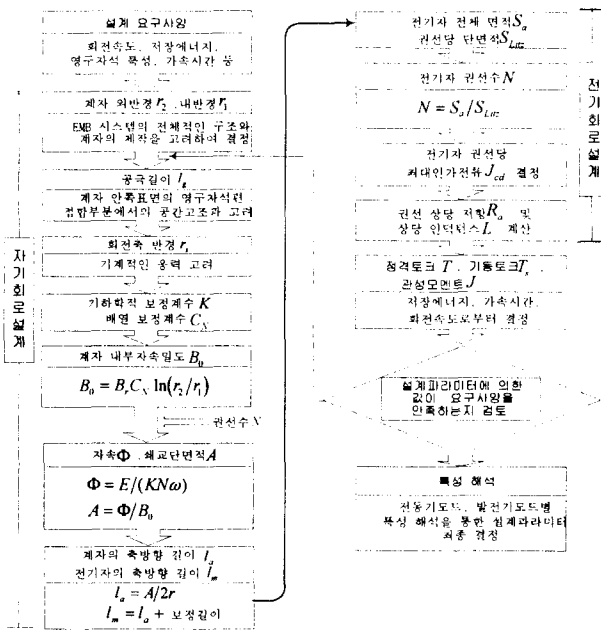


그림 5 설계흐름도
Fig. 5 Flow chart for the design

표 2 전동발전기의 설계 파라미터
Table 2 Design Parameters of M/G

항목	치수	항수	값
내부 자속밀도	0.25 [T]	축 직경	40 [mm]
PM 내경	70 [mm]	상당 권선수	17
PM 외경	90 [mm]	발생토크	0.57 [Nm]
PM 축방향길이	177.8 [mm]	상당 저항	85 [mΩ]
전기자 외경	51 [mm]	상당 인덕턴스	50 [μH]
M/G 길이	170 [mm]	입력전류	16 [A]
전류 밀도	5 [A/mm ²]	상수	3

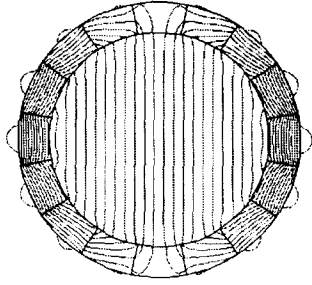


그림 7 원통형 Halbach 배열 계자의 자속분포
Fig. 7 Flux lines of cylindrical Halbach array

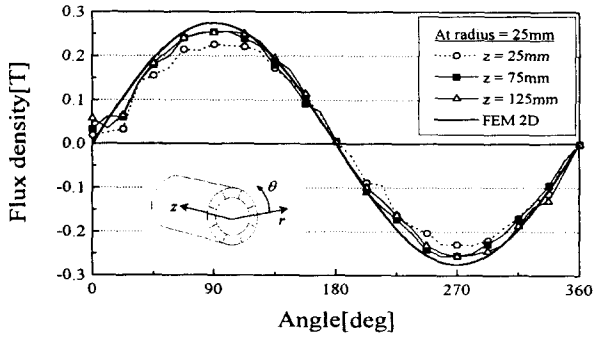
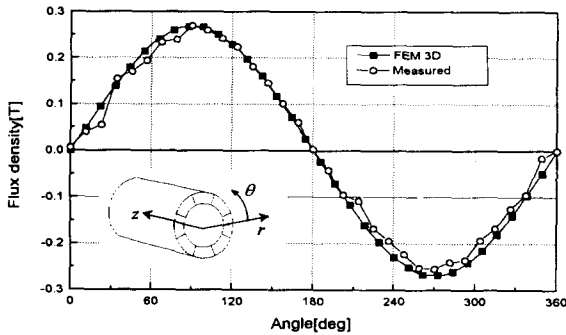
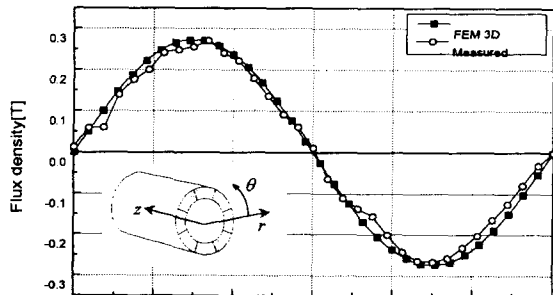


그림 8 Halbach 내부의 자속밀도 분포(2D FEA와 실험치)
Fig. 8 Distribution of flux density in Halbach array



(a) z=25mm, r=25mm



(b) z=88.9mm, r=25mm

그림 9 Halbach 내부의 자속밀도 분포(3D FEA와 실험치)
Fig. 9 Distribution of flux density in Halbach array

3.3 전기자 저항 및 인덕턴스 특성

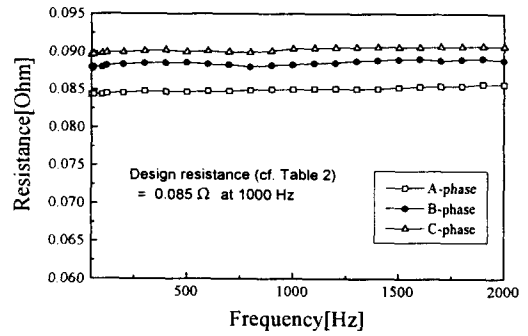
그림 10은 전기자 권선의 주파수에 따른 각상의 저항 및 인덕턴스를 RLC 메터로 측정한 값과 표 2의 설계사양과 식 (6)과 (7)에 의해 계산된 값을 보여준다. 각 상의 저항과 인덕턴스는 A상을 기준으로 각각 5.9%, 5.08%의 불평형을 이루는데, 이는 제작시 권선시행에 따라 발생된 결과로 사료된다. 그러나 표 2의 설계치인 상당 저항 0.085[Ω], 인덕턴스 50[μH]와 비교해 볼 때 비교적 잘 부합됨을 볼 수 있다.

3.4 EMB용 Halbach 배열형 전동발전기의 자계 특성과 회로정수를 통한 초고속성 검토

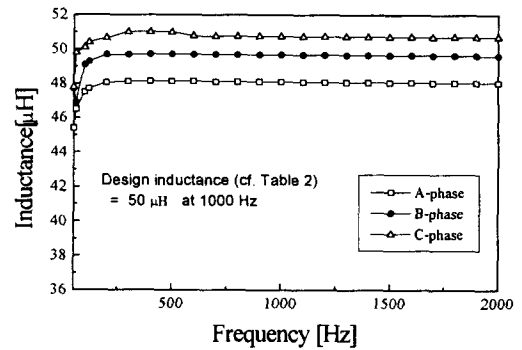
본 절에서는 EMB 시스템의 초고속 전동발전기로 Halbach 형이 적합한지를 검토하고자 한다. 먼저, 본 논문의 전동발전기 시스템의 특징은 아래와 같다.

- 60000[rpm]급 초고속 영구자석형 브레시레스 기기
- 영구자석 Halbach 배열로 계자 시스템을 구성
- 고정자와 회전자 모두 철심을 사용하지 않음
- 전기자 권선으로 리프션을 사용
- 진공상태에서의 운전
- 자기베어링 채용

따라서 위의 6가지 항목에 의해 Halbach형 전동발전기는 다음과 같은 특성을 갖는다.



(a)



(b)

그림 10 주파수에 따른 상당 저항/인덕턴스 특성
(a) 저항 (b) 인덕턴스

Fig. 10 Phase resistance and inductance vs. frequency
(a) resistance (b) inductance

- 초고속 기기이므로 전기자 상당 턴수는 표 2에서 17턴으로 일반 기기보다 작다.
- Halbach형 계자를 사용하므로 그림 6, 그림 7, 그림 8에서와 같이 정현적이고 강한 자속을 얻는다. 따라서 초고속 구동시 자성체에서의 손실은 물론 공간고조파에 의한 영구자석에서의 손실도 거의 발생되지 않는다.
- 전기자 턴수가 작고 철심을 사용하지 않으므로 표 2의 설계치와 그림 10의 결과로부터 Halbach형 기기는 철심형 기기보다 상대적으로 저항과 인덕턴스가 매우 작으므로 임피던스 강하도 작다.
- 일반적으로 철심에서의 시간고조파에 의한 손실을 줄이기 위해 정현과 구동을 하는데, Halbach 배열형 기기는 코어리스 기기이므로 이를 고려하지 않아도 된다. 따라서 구동회로가 비교적 간단한 180° 도통각을 갖는 구형과 방식을 채용할 수 있다.
- 전기자에 리쯔선을 사용하여 코일의 표피효과에 의한 손실이 매우 작다.
- 진공 운전 및 자기베어링을 채용하였으므로 풍손 및 베어링 마찰손이 거의 없다.

따라서 전동발전기의 대부분의 손실은 전기자 저항손일이다. 결과적으로 EMB 시스템의 전동발전기로 선정한 Halbach 배열형 기기는 컴팩트하면서도 동일 체적당 출력과 효율이 높은 초고속 기기로 적합함을 알 수 있다.

4. 전동발전기의 모드별 특성

전동발전기는 전동 모드와 발전 모드의 두 가지 기능을 가역적으로 전환하여 운전하는 기기이기 때문에 각 모드에서의 특성 해석과 시험이 수행되어야 한다. 특성해석은 2.3절에서 유도한 각 모드에서의 특성방정식과, 이를 바탕으로 그림 5의 전기회로 및 자기회로의 설계 수순에 의해 결정된 표 2의 설계 파라미터를 적용한다.

4.1 발전 모드 특성

4.1.1 출력 단자 전압 파형

발전모드에서 출력 단자전압 파형의 특성을 파악하기 위해 회전속도 3000 [rpm]에서 u-v, v-w상의 출력전압 파형을 측정하여 그림 11에 제시하였다. 횡축과 종축은 각각 시간과 선간 전압의 순시치를 나타내는데, u-v와 v-w의 최대치는 각각 50Hz 13.6[V], 11.7[V]이며 위상차는 120° 이다. 그림 8과 그림 9에서와 같이 자속밀도 분포가 정현적인 분포를 하기 때문에 유기전압 파형도 근사적으로 정현적인 파형을 갖는다.

4.1.2 회전속도에 따른 출력 단자전압의 최대치 특성과 유기전압 상수

그림 12는 발전모드에서 무부하시 회전속도에 따른 선간 출력 전압의 최대치를 나타낸 것이다. 자기베어링, 드라이브 등의 전체 시스템 사정에 의하여 5700rpm까지만 운전한 실험결과인데, 실험치가 계산치보다 다소 높게 나타났다. 이는 그림 8과 9에서 계자 내부 자속밀도의 FEM 해석치 및 실험치 측정을 r=25mm에서 수행하였으나 실제 제작된 회전자 반

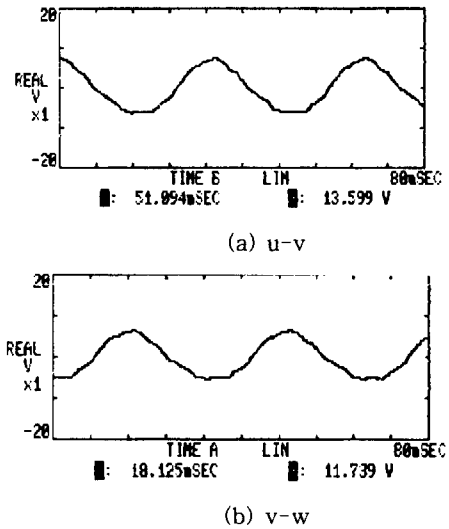


그림 11 발전모드에서 출력단자 전압 파형
Fig. 11 Waveform of terminal voltage under generating mode

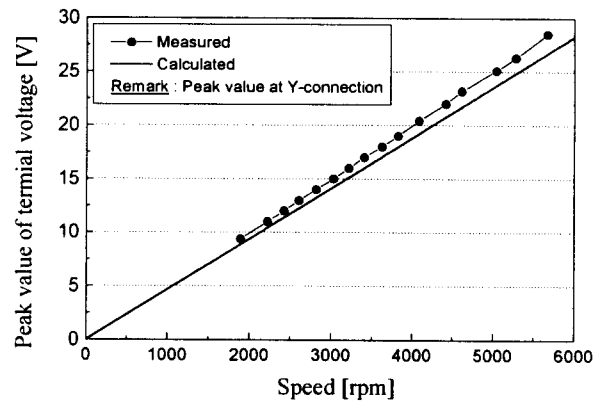


그림 12 회전속도에 따른 출력 단자전압의 최대치 특성
Fig. 12 Peak value of output terminal voltage vs. rotating speed

경은 표 2에서와 같이 r=25.5mm이므로 유효권선이 증가하여 실험치가 커진 것으로 판단된다. 또한 식(3)에서 기하학적 보정계수 K의 결정시 전동발전기의 제작 상태를 정밀하게 반영하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 식(4)에 의한 유기전압 상수의 계산치는 0.0446 [V · sec/rad], 식(11)에 의해 얻어진 실험치는 0.0484[V · sec/rad]로서 역시 실험치가 약간 높다.

$$K_E = \frac{\Delta E}{2\pi \cdot \frac{\Delta rpm}{60}} \quad (11)$$

여기서 ΔE, Δrpm은 각각 유기전압 및 속도의 변화량이다.

그런데 전기자와 계자가 코어리스이므로 자기포화현상이 없기 때문에 입력주파수에 따른 무부하 발전전압은 전반적으로 선형적인 특성을 가질 것으로 사료된다. 따라서 그림 12의 실험결과로부터 최대속도 60,000rpm에서 설계치 출력전압인 220[V]가 충분히 발전될 수 있음을 예상할 수 있다.

4.1.3 발전 출력 및 효율

발전모드의 경우, 출력과 효율은 3.3절에서 제시한 회로정수를 통해 구할 수 있다. 즉, 표 3은 정격속도 60000[rpm]에서 운전된다고 가정할 때에 식 (9)와 식(10)에 의해 계산된 부하저항에 따른 발전출력과 효율 특성인데, 3.4절에서 검토한 바와 같이 부하저항 5[Ω]이상에서는 99% 이상의 높은 발전 효율을 보인다.

표 3 발전 출력에 대한 효율

Table 3 Generating Efficiency vs. Output Power

부하 저항(Ω)	발전 출력(kW)	효율(%)
12.5	3.8	99.8
10	4.8	99.7
8	5.9	99.6
5	9.3	99.4
2.5	17.8	98.9

4.2 전동모드시 인버터 출력 전류 특성

본 논문의 전동발전기는 외전형 BLDC 모터로 180° 도통각을 갖는 구형파 방식으로 구동된다. 모터제어를 위한 위치 및 회전속도의 검출은 회전축 상단 주위에 120°의 위상으로 배열된 3개의 광센서로 검출한다.

그림 13은 인버터 내부에서 AC220[V]와 IGBT 소자에 의한 초핑 출력전압사이의 DC 정류부의 신호원 전압값에 따라 인버터 출력전압 및 전류가 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 횡축은 시간 단위로 20[s/div]이며, 종축은 전압으로 200[V/fs], 전류는 20[A/fs]이다. 단, fs는 full scale의 약자이다. 또한 그림 14는 전동발전기의 상권선에 흐르는 전류 파형을 나타내는데, 일반 BLDC 모터의 일정 전류 제어 때와 비교하여 파형의 형태가 거의 유사함을 알 수 있다.

4.3 모드 전환(정전)시 입출력 파형

그림 15는 시스템을 정상 상태에서 전동모드로 운전하다가 정전이 되었을 때, 발전모드로의 전환시에 EMB 시스템에서 입출력되는 전압 및 전류 파형을 보여준다. 정전시점에서 EMB 시스템에 입력되는 전압은 0이 되지만, EMB 최종단에서 출력되는 전압과 전류는 정전시에도 정상적으로 부하에 전력이 공급됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 EMB 시스템의 구동원인 초고속 전동발전기를 NdFeB 계열 영구자석의 Halbach 배열을 응용하여 계자를 구성하고 코어리스 전기자를 설계·제작한 후, 그 특성을 연구 검토하였다.

시스템에서 요구되는 2극 60,000rpm급 전동발전기의 각 모드에서 설계 사양을 만족시킬 수 있도록 특성방정식을 바탕으로 하여 설계·제작하였다. 또한 제작된 전동발전기는 FEM 해석과 실험을 통해 자체특성과 회로정수를 얻었고 이를 통해 EMB 시스템용 초고속 기기로서의 응용성을 검토하였다. 한편, 구동 드라이버와 자기베어링, 플라이휠 등의 시스

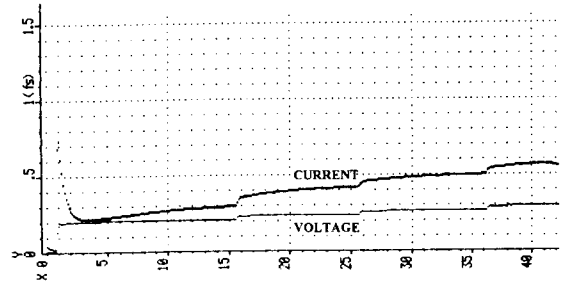


그림 13 인버터 출력전압 및 전류 (횡축-시간, 종축-전압, 전류) fs:full scale
Fig. 13 Output voltage and current of an inverter horizontal axis: time, vertical axis: voltage, current

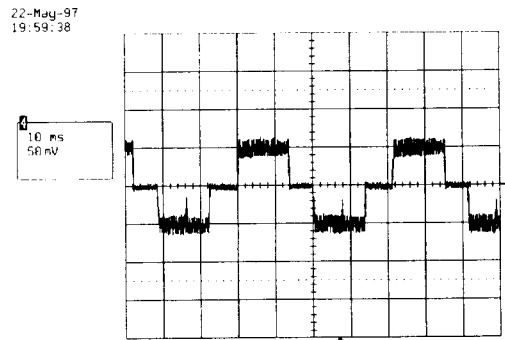


그림 14 전동 모드시 상전류 파형(50A/div)
Fig. 14 Waveform of phase current at motor mode

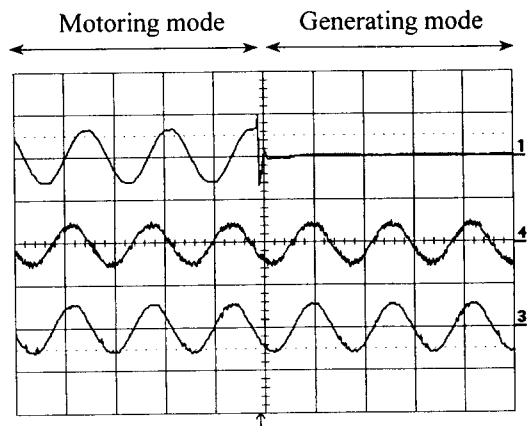


그림 15 정전(전동모드에서 발전모드로의 전환시 EMB 시스템의 입출력 파형(10A/div, 200V/div)
1. 입력 전압 4. 출력 전류 3. 출력 전압
Fig. 15 In/out-put waveform of EMB system at each mode
1. Input voltage, 4. output current, 3. output voltage)

템을 구성하고 성능시험을 통하여 구동 시스템의 입·출력 특성, 발전전압의 파형 및 크기, 유기전압상수 특성 등의 결과를 도출하였다. 그리고 이를 해석결과와 비교 검토를 통하여 아래와 같은 결과를 얻었다. 즉,

- NdFeB 영구자석 Halbach 배열형 초고속 전동발전기의 계자는, 별도의 폐자로를 구성하기 위한 철심이 없이 내부에 약 0.3 [T] 정도의 강력한 자계를 발생할 수 있기 때문에 전기자를 코어리스로 제작할 수 있다. 즉, 플라스틱 보빈에 리쯔션으로 권선을 시행하므로써 코일의 표피효과에 의한 손실을 최소화하였다. 따라서 초고주파 전원에 의한 고속 운전시 효율 98%이상으로 손실이 거의 없는 시스템 구성이 가능하였으며, 이로써 중량 및 체적의 저감을 통한 컴팩트·고효율화된 기기가 되도록 하였다.
- 초고속 구동시 역기전력이 크므로 전기자 상당 턴수는 일반 기기보다 적고, 코어리스 구조이므로 일반 철심형 기기보다 상대적으로 저항과 인덕턴스가 매우 작다. 또한 진공상태에서의 회전 및 무접촉 자기베어링을 채용하여 전동발전기의 대부분의 손실은 전기자 저항손뿐이며, 이 또한 매우 작기 때문에 효율 98%이상의 고효율 기기임을 확인하였다.
- 발전모드 특성 시험을 통해 출력되는 발전전압 특성은 회전속도에 따른 발전전압이 매우 선형적인 특성임을 확인하였다. 또한 유기기전력 상수도 특성식에 의한 계산치는 0.0446[V · sec/rad], 실험치는 0.0484[V · sec/rad]로서 실험치가 약간 차이가 나지만, 이는 자속밀도 측정시의 오차와 보정계수 K 값의 설정에서 실제 형상을 정확히 반영하지 못했기 때문인 것으로 사료된다.
- 인버터의 출력 특성, 전동모드시 특성식에 의한 토크 및 역기전력 특성, 정전시 EMB 시스템의 입출력 특성 등을 통해 전동모드 및 모드전환시의 특성도 확인하였다.

따라서 이러한 결과들을 통해 초고속 전동발전기의 계자 및 전기자 권선의 설계 및 제작, EMB 시스템에의 응용 타당성 등을 검토할 수가 있었다. 이로써 이 분야의 연구를 위한 기반을 확립한 것으로 사료되며, 향후 자기베어링, 구동드라이버 등 전체 시스템의 안정화의 실현과 이를 통한 정밀 연구를 계속하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사(기초전력공학 공동연구소)의 연구과제 95-지-04의 일부와 통산산업부(에너지관리공단)의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] B.T. Merritt, R.F. Post, G.R. Dreifuerst, D.A. Bender, "Halbach Array Motor/Generators-A Novel Generalized Electric Machine", Lawrence Berkeley Laboratory, Univ. of California, Berkeley, CA, 94720, Feb.1995
 [2] R.F.Post et al, "Electro-mechanical Battery Research and Development L.L at the Nat'l Lab.", 26th International Symposium on Automotive Technology and

Automation, Achen, Germany, Sept.13-17, 1993
 [3] "Synchronous Reluctance Motors and Drives - A new Alternative-", 1994 IEEE Industry Applications Society 29th Annual Meeting, Denver Co. Oct.2,1994
 [4] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, "영구자석 Halbach 배열을 이용한 초고속 모터용 계자시스템의 구성과 특성 해석", 대한전기학회 논문지 제 48B권, 제 4호, 1999. 4
 [5] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear instruments and Methods, 169,1980(pp.1-10)
 [6] D. L.Trumper, M. E.Williams "Halbach Arrays in Precision Motion Control", Lawrence Berkeley Laboratory, Univ. of California, Berkeley, CA, 94720, Feb. 1995
 [7] 禹亨麟, 이운중, "最新 電氣磁氣學", pp. 222-223, 文運堂, 1989.

저 자 소 개

장 석 명 (張 錫 明)
 전기학회논문지 48B권 4호 참조
 Tel : (042) 821-5658
 E-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr

서 진 호 (徐 鎭 鎬)
 전기학회논문지 48B권 4호 참조
 Tel : (042) 822-4933
 E-mail : jinho@ee.chungnam.ac.kr

정 상 섭 (鄭 相 燮)
 전기학회논문지 48B권 4호 참조
 Tel : (042) 822-4933
 E-mail : sangsub@ee.chungnam.ac.kr

최 상 규 (崔 相 奎)
 전기학회논문지 48B권 4호 참조
 Tel : (042) 868-7351
 E-mail : skchoi@mailgw.kimm.re.kr



함 상 용 (咸 尚 龍)
 1961년 1월 25일생, 1988년 대전산업대 전자공학과 졸업(학사), 1991년 청주대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1981년~현재 한국기계연구원 장비개발그룹 재직, 연구분야 : 전자제어, 메카트로닉스, 전력제어
 Tel : 042-868-7613
 E-mail : hamsy@mailgw.kimm.re.kr